

ВЕКТОРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Б.С. Соболев

(г.Екатеринбург, Институт математики и механики УрО РАН, sbs2810@mail.ru)

VECTOR MATHEMATICAL MODEL OF REFLECTOR ANTENNA

B.S. Sobolev

В [1] в соответствии с принципом суперпозиции электромагнитных волн (ЭМВ) (например, [2], с.386) были разработаны принципиальные основы векторной математической модели зеркальных антенн. В ([3], с.25) отмечено, что использование элементарных электрических излучателей, например, в виде диполей Герца (ДГ) и принципа суперпозиции, полезно для изучения сложных проволочных антенн. Позднее ([4], с.30) было предложено рассматривать зеркальную антенну (ЗА) при исследовании ее поляризационных характеристик в виде «совокупности двух ортогональных в пространстве электрических диполей с произвольным отношением модулей их моментов». В конечном итоге диаграмму направленности (ДН) зеркальной антенны можно рассматривать в качестве эквивалентной ей решетки ДГ.

Предложено рассматривать математическую модель ЗА как антенную решетку в виде не двух, а трех элементарных электрических излучателей (ЭЭИ), произвольно расположенных в пространстве. Это показано на примере зеркальной антенны не с одиночным, в отличие от [4], а со сложным облучающим устройством в виде антенной решетки (АР).

Пусть геометрия ЗА произвольно задана (в разумном смысле) массивом точек $\{M_i\}_{i=1}^T$, а облучающая АР из L излучателей с их центрами – массивом $\{C_l\}_{l=1}^L$ в некоторой системе координат, например в ДСК (рис. 1). Множество точек наблюдения излучения ЗА в дальней зоне определим в виде $\{P_b\}_{b=1}^B$.

Если задать \vec{q}_l в качестве единичного вектора поляризации электрического поля излучателя, то модельный вектор напряженности магнитного поля \vec{H}_{M_i} можно представить в следующем виде:

$$\vec{H}_{M_i} = \sum_{l=1}^L (\vec{q}_l \times \vec{C}_l M_i^o) (\vec{C}_l^o, \vec{C}_l M_i^o)^\alpha A \Phi_l \exp(-jk |\vec{C}_l M_i^o|) / |\vec{C}_l M_i^o|, \quad (1)$$

где \times – операция векторного произведения, $(\vec{C}_l^o, \vec{C}_l M_i^o)$ – операция скалярного произведения этих векторов; $\vec{C}_l M_i^o$ – единичный вектор в направлении вектора $\vec{C}_l M_i$; \vec{C}_l – вектор в направлении оси l -го излучателя, \vec{C}_l^o – его единичный вектор (в общем случае направления осей $\{\vec{C}_l^o\}_{l=1}^L$ можно выбирать различным образом, считая их параметрами математической модели антенны); $(\vec{C}_l^o, \vec{C}_l M_i^o)^\alpha$ – зависимость амплитуды поля l -го излучателя от направления на точку M_i , т.е. его амплитудная ДН (α – вещественное число); $A \Phi_l = E_l \exp(-j\Phi_l)$, где E_l, Φ_l – амплитуда и фаза возбуждения l -го излучателя АР (например, в виде рупора); $k = 2\pi / \lambda$, λ – рабочая длина волны.

¹ Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Математическая теория управления» при финансовой поддержке УрО РАН (проект 09-П-1-1013).

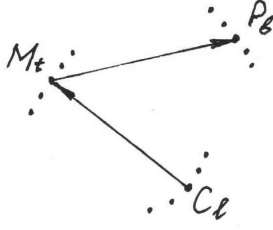


Рис. 1

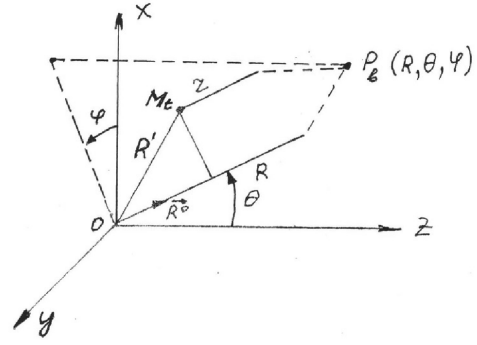


Рис. 2

Для расчета или синтеза нормированной диаграммы направленности (ДН) вектор напряженности магнитного поля \vec{H}_{Mt} вблизи любой точки M_t рефлектора ЗА можно вычислять с точностью до постоянных множителей. Это относится и к множителям, определяющим размерность, например $W_o = 120\pi \text{ Ом}$, поскольку в процедурах нормирования они сократятся. Таким образом, модельный вектор напряженности \vec{H} магнитного поля является соосным и пропорциональным его физическому аналогу. В дальнейшем этот модельный вектор будет идентифицирован как вектор напряженности электрического поля \vec{E} . Величина \vec{J}_{Mt} поверхностного тока на элементарной криволинейной площадке ΔS_t с точностью до постоянного множителя связана с \vec{H}_{Mt} известным соотношением: $\vec{J}_{Mt} = (\vec{n}_{Mt} \times \vec{H}_{Mt})$, где \vec{n}_{Mt} – единичный вектор внутренней нормали в точку M_t .

В итоге, модельный эквивалентный вектор тока на элементарной площадке рефлектора принимает вид $\vec{I}_{Mt} = (\vec{n}_t \times \vec{H}_{Mt})$, $\vec{n}_t = (-f'_x, -f'_y, 1)$, где \vec{n}_t – вектор, соосный с \vec{n}_{Mt} . В результате $\vec{I}_{Mt} = (\vec{i}_x I_{Mtx} + \vec{i}_y I_{Mty} + \vec{i}_z I_{Mtz})$. Это векторное равенство означает, что в физическом смысле \vec{I}_{Mt} можно интерпретировать в виде линейной комбинации трех ДГ, ориентированных по осям ДСК.

Таким образом, вектор \vec{H}_p в точках наблюдения $\{P_b\}_{b=1}^B$ (см. рис. 2) в дальней зоне представим в виде

$$\vec{H}_p = \sum_{t=1}^T (\vec{I}_{Mt} \times \overrightarrow{M_t P_b^o}) \exp(-jk |\overrightarrow{M_t P_b}|) / |\overrightarrow{M_t P_b}|, \quad (2)$$

где $|\overrightarrow{M_t P_b}|$ – модуль вектора $\overrightarrow{M_t P_b^o}$, а $\overrightarrow{M_t P_b^o}$ – его единичный вектор.

После использования известных допущений (см. например, [3], с.18) и исключения стандартной зависимости поля от расстояния по закону $\exp(-jkR)/R$ получаем:

$$\vec{H}_p = \sum_{t=1}^T (\vec{I}_{Mt} \times \vec{R}^o) \exp[jk(\overrightarrow{OM_t}, \vec{R}^o)], \text{ где } \vec{R}^o = \vec{i}_x \cdot \sin \theta \cos \varphi + \vec{i}_y \cdot \sin \theta \sin \varphi + \vec{i}_z \cdot \cos \theta, \text{ а}$$

$$\vec{E}_p = (\vec{H}_p \times \vec{R}^o) = \sum_{t=1}^T [(\vec{I}_{Mt} \times \vec{R}^o) \times \vec{R}^o] \exp[jk(\overrightarrow{OM_t}, \vec{R}^o)]. \quad (3)$$

Для вертикальной поляризации (ВП) поляризационный вектор электрического поля \vec{q} в ДСК равен \vec{i}_x , а для горизонтальной – совпадает с \vec{i}_y (\vec{i}_x, \vec{i}_y – орты ДСК). Если определить ориентацию вектора напряженности магнитного поля в дальней зоне в виде $\vec{q}_H = \vec{q} \times \vec{R}^o$, а электрического – $\vec{q}_E = (\vec{q} \times \vec{R}^o) \times \vec{R}^o$, то в явном виде единичные поляризационные вектора \vec{q}_{EV} , \vec{q}_{HV} и \vec{q}_{EH} , \vec{q}_{HH} для ВП и горизонтальной поляризации (ГП) соответственно определяются как

$$\vec{q}_{HB} = \vec{i}_x \times \vec{R}_p^o, \quad \vec{q}_{EB} = (\vec{i}_x \times \vec{R}_p^o) \times \vec{R}_p^o, \quad \vec{q}_{HG} = \vec{i}_y \times \vec{R}_p^o, \quad \vec{q}_{EG} = (\vec{i}_y \times \vec{R}_p^o) \times \vec{R}_p^o. \quad (4)$$

Эти выражения позволяют определить ненормированную векторную комплексную характеристику направленности поля ЗА $\vec{F}(\theta, \phi)$ в виде скалярных произведений. Для ВП диаграммы направленности на основной и кроссполяризационной составляющих поля будут иметь вид

$$F_{осн}(\theta, \phi) = (\vec{q}_{EB}, \vec{E}_p), \quad F_{кр}(\theta, \phi) = (\vec{q}_{HB}, \vec{E}_p), \quad (5)$$

где $F_{осн}(\theta, \phi)$, $F_{кр}(\theta, \phi)$ – соответственно основная и кроссполяризационная компоненты нормированной векторной комплексной ДН ГЗА (аналогично и для ГП, в этом случае в (5) вместо \vec{q}_{EB} , \vec{q}_{HB} используются \vec{q}_{EG} , \vec{q}_{HG}). Это позволяет по известным методикам (например, [3]) рассчитать все интересующие параметры АС.

Перспективность и актуальность создания векторной математической модели ЗА обусловлены анализом и выводами ведущих специалистов секции прикладных проблем при Президиуме РАН [5]. Векторная математическая модель ЗА позволяет:

1. *Значительно упростить* расчет векторных ДН этих систем за счет исключения использования вспомогательных систем сферических координат (например, как в [4]), а также местных сферических координат, в которых традиционно представляют ДН излучающих элементов в составе облучающей АР.

2. *Унифицировать* алгоритмы расчета векторных ДН ЗА и гибридных ЗА (ГЗА) любых конфигураций.

3. *Упростить* вычислительные процессы при оптимальном синтезе ДН ГЗА [6], профилей ЗА [7] и определении структур быстродействующих алгоритмов управления лучом ГЗА в необходимом секторе сканирования (например, с сохранением неизменной конфигурации луча в секторе [8] и т.д.).

Литература

1. Панченко Б.А., Наймушин М.П., Соболев Б.С. и др. Промежуточный отчет по НИР «Исследование возможностей построения системы электронного поиска высокоэффективных зеркальных антенн», УПИ – ОКБ МЭИ, Свердловск, 1976, 233с.
2. Дитчберн Р. Физическая оптика. М.: «Наука», 1965, 631 с.
3. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975, 528с.
4. Нарбут В.П., Хмель В.Ф. Поляризация излучения зеркальных антенн. Киев, «Вища школа», 1978, 280 с.
5. Акиншин Р.Н., Быстров Р.П., Кузнецов Е.В. и др. Развитие радиоэлектронной техники радиолокационных систем. Успехи современной радиоэлектроники, 2005, 10, с.24-58.
6. Гусевский В.И., Соболев Б.С., Семенов Б.В. и др. Синтез ДН ГЗА с двойным фазовым управлением. Сб. «Антенны», вып. 1(40), 1998, с. 15-20.
7. Арестов В.В., Балаганский В.С., Гусевский В.И. и др. Антенная система спутниковой связи на базе ГЗА с изменяемой формой и ориентацией луча. Proc. III Int. Conf. "Antennas Radiocommunication Systems and Means" (ICARSM'97), Voronezh, May, 1997, p. 122–126.
8. Плещев В.М., Семенов Б.В., Соболев Б.С. и др. Фазовый синтез в задаче выбора поверхности зеркальной антенны. 4-я Межд. Конф. «Спутниковая связь – 2000». Москва, 2000, с. 103–112.